

MODELACIÓN MEF DE LADRILLOS CERÁMICOS HUECOS A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES¹

Oscar Möller², Fernando R. Detke³, Hugo O. Reinert⁴, Javier A. Duarte⁵, Antonio M. Boni⁶.

¹ Trabajo de Investigación, Proyecto del Programa de Incentivos Código 16-I131

² Director de Proyecto, Doctor Ingeniero, moller@fceia.unr.edu.ar

³ Co-director de Proyecto, Ingeniero Civil, detke@fio.unam.edu.ar

⁴ Docente Investigador, Magister Ingeniero, reinert@fio.unam.edu.ar

⁵ Docente Investigador, Ingeniero en Construcciones, duartej@fio.unam.edu.ar

⁶ Integrante de Proyecto, Estudiante Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Argentina, matiasboni@gmail.com

Resumen

Un modelo matemático permite traducir el comportamiento de un determinado sistema analizado en la realidad al campo numérico. En el caso de las mamposterías se hace necesario descubrir la respuesta de la misma ante las acciones actuantes en su ámbito de uso, es decir en el caso de cerramientos de viviendas. A efectos de lo anterior se necesita conocer cómo se comporta un mampuesto cuando es sometido a una carga de compresión. El objetivo del presente trabajo es analizar un mampuesto por el Método de los Elementos Finitos (MEF) ajustando sus parámetros geométricos y mecánicos sobre la base de ensayos destructivos realizados en laboratorio. Se espera que los resultados permitan iniciar procedimientos de modelación ampliados al campo de las mamposterías de viviendas sociales.

Palabras Clave: *Modelo MEF – Ladrillos LCH – Datos Experimentales.*

Introducción

El uso de ladrillos cerámicos huecos (LCH) en mampuestos de viviendas sociales está siendo cada vez más habitual en la Provincia de Misiones. Por tal motivo se propone en el marco de un proyecto de investigación un modelo de elementos finitos que sea capaz de reproducir el comportamiento de un ladrillo LCH a partir de establecer estimaciones de un conjunto de parámetros geométricos (alto, ancho, profundidad, espesor de paredes), condiciones iniciales (como ser disposición, apoyo, cargas actuantes) y relaciones constitutivas del material obtenido en forma experimental mediante el ensayo a compresión de probeta elaborada con material cerámico componente de dichos ladrillos. La caracterización del material constituyente basado en un análisis estadístico de ensayos destructivos realizados en laboratorio. Dentro de este lineamiento, el presente trabajo tiene como objetivo calibrar el modelo matemático presentado anteriormente a efectos de mejorar el ajuste de sus resultados y los obtenidos en forma experimental a través de ensayos de ladrillos realizados a compresión hasta el instante de la rotura de la pieza. Se espera poder comprender lo que se visualiza en los ensayos destructivos con el fin de establecer en el modelo matemático los criterios y artificios necesarios para lograr un adecuado ajuste permitiendo de esta manera presentar una opción sencilla y económica para la caracterización de este tipo de materiales.

Metodología

Se utilizó como base el modelo LCH1 de elementos de Área presentado en el año anterior y a partir del cual se fueron haciendo los ajustes respecto a las características del material. El cambio principal se enfocó en trabajar con un modelo de barras representativo de una sección transversal del ladrillo, dado que se observó en los ensayos la posibilidad de que exista un efecto de “Marco” o “Pórtico” entre paredes horizontales y verticales del ladrillo. La figura 1 muestra una descripción de ambos modelos.

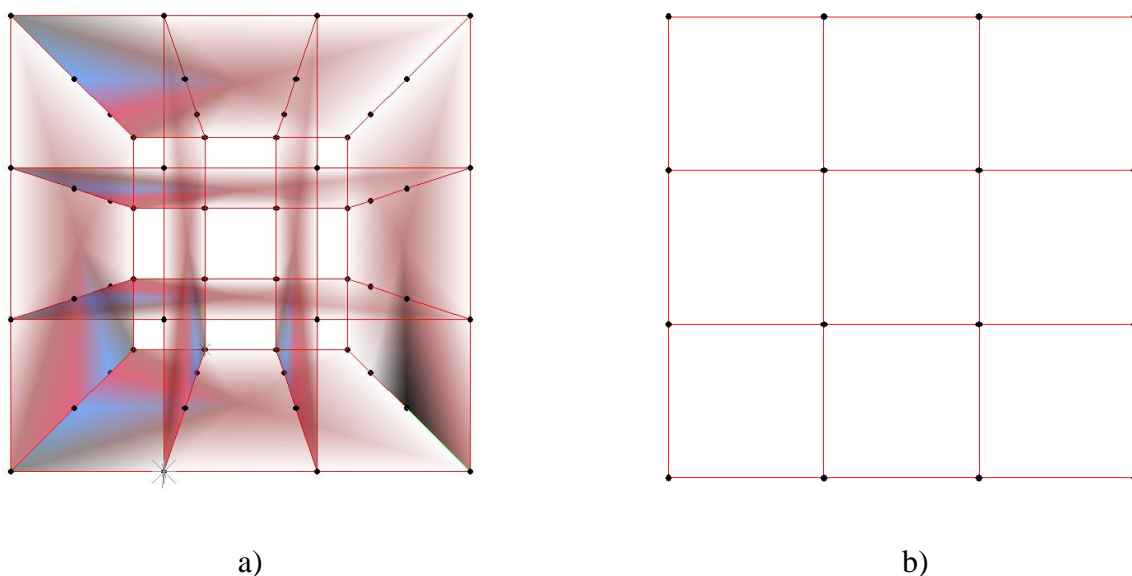


Figura 1. Modelos de Elementos finitos: a) Modelo LCH1, b) Modelo LCH2

En esta ocasión se definió al material LCH como isotrópico al cual se le ha asignado un M de Módulo de Elasticidad promedio obtenido a partir de los ensayos realizados sobre probetas de cerámica preparadas el objeto de obtener en forma experimental los parámetros constitutivos del material de base. La Figura 2 muestra el montaje para el ensayo a compresión realizado en probetas de cerámica. Se buscó que las mismas tuvieran un tamaño representativo de los espesores de pared de los mampuestos estudiados.



Figura 2. Ensayo a Compresión de una probeta de Cerámica.

A fin de caracterizar el material para utilizarlo en el MEF del ladrillo cerámico el software empleado (SAP2000 V14) define al material con los siguientes parámetros:

a) Módulo de elasticidad, el cual se asumió como isotrópico lineal utilizando el promedio obtenido del análisis estadístico de los ensayos de las probetas a compresión en el laboratorio. b) Módulo de Poisson, al no ser el material isotrópico lineal, se buscó por medio de un trabajo de correlación de imágenes relacionar los estados de deformaciones en dos direcciones sobre el plano del ensayo. c) Coeficiente térmico, que para este modelo todavía se adoptó según datos predeterminados en el software de apoyo.

Con respecto a la relación constitutiva del material, se adoptó la función tensión-deformación obtenida en forma experimental de ensayo mecánicos a rotura por compresión adoptándola como lineal y confeccionándola según el promedio de las cargas últimas (compresión y tracción), y del área de la sección de las probetas ensayadas:

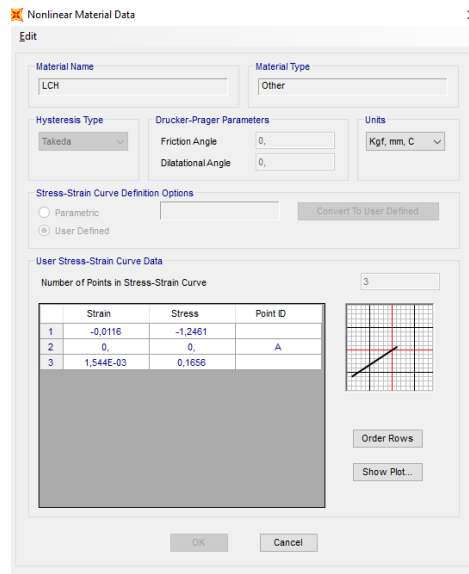


Figura 3. Configuración de Función constitutiva para el material en el software SAP2000.

Con respecto a la geometría, se hicieron pruebas considerando excentricidades accidentales propias del proceso de fabricación, para determinar si tienen un efecto importante o no en el comportamiento del mampuesto y si produce diferencia de resultados entre valores empíricos y los obtenidos en forma numérica. la Figura 4 muestra las opciones analizadas entre dos muestras analizadas (ladrillo 333 y Ladrillo 331).

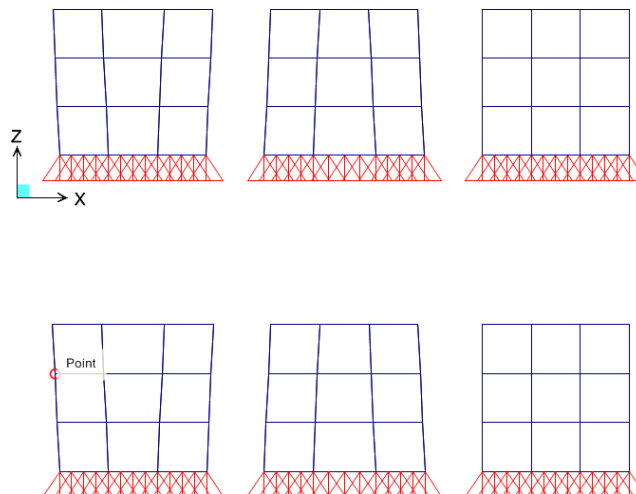


Figura 4. Modelos de elementos finitos de barras para los ladrillos 333 y 331, con y sin consideración de defectos de fábrica.

Con respecto a las cargas actuantes se adoptaron los casos Peso Propio del mampuesto y Rampa de Carga del ensayo experimental a rotura por Compresión. Se aplicó el criterio de discretizar cargas puntuales y aplicarlas en línea con cada pared vertical, en función a la incidencia de cada una de ellas, por tanto la mayor proporción de la carga total se aplicó en las paredes verticales centrales del modelo de mampuesto. Luego se afectó un patrón de carga variable a dichas cargas puntuales a efectos que la suma de ellas del valor de carga del

ensayo experimental en intervalos de tiempo relevados del mismo. Para ello se utilizó la herramienta Time History Function incluida en el software. En ella se configuró un patrón de carga, y un valor de carga para un determinado instante de tiempo, tal como se puede observar en la Figura 5.

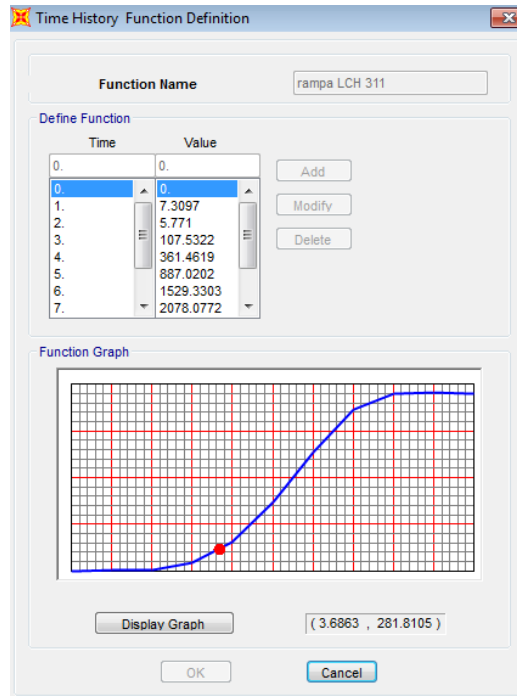


Figura 5. Función de carga que simula la rampa utilizada en el ensayo Experimental.

En términos del análisis estructural empleado se estableció que el estado de carga del ensayo propiamente dicho inicie en serie después del estado de carga Peso Propio, el cual se consideró como no lineal, para incorporar la diferencia en el mismo en cuanto a su prestación en resistencia a diferentes esfuerzos ya que no resiste a tracción en idéntica proporción que a compresión, lo que se puede ver en la figura 6.

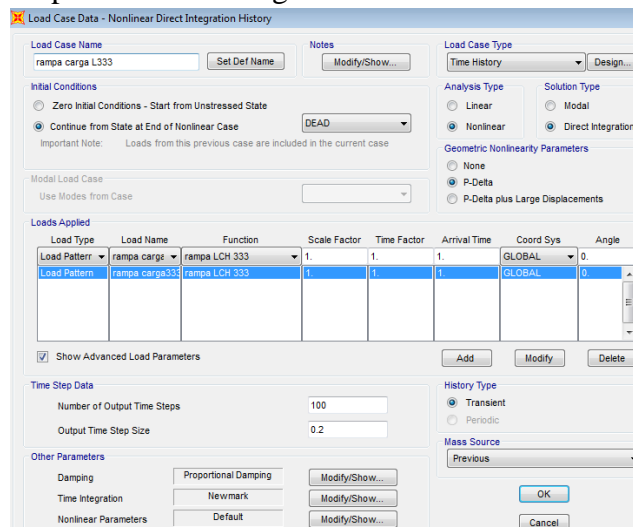


Figura 6. Caso de Carga adoptado para el análisis.

Resultados y Discusión

La figura 7 muestra cómo se sucede la rotura en la mayoría de los ensayos de este tipo de mampuestos. En la imagen se puede ver una potencial falla inicial por esfuerzo de tracción y/o corte en los laterales del mampuesto. Luego el sistema pierde estabilidad y alcanza el estado final de rotura.



Figura 7. Ensayo de un Mampuesto a Compresión.

Se analizaron los valores de deformación para el tiempo $t: 10\text{seg}$ de la rampa de carga y se pudieron observar los siguientes aspectos tales como Desplazamientos relativos de los puntos componentes del modelo en el eje x , según se puede ver en la figura 7. Desde las figura 8 a Figura 11 se representaron los diagramas de esfuerzos que arrojó el modelo numérico, a saber: Tensiones en Kg/mm^2 , Esfuerzo Axial en Kg , Esfuerzo de Corte en Kg , y Momento Flector en $\text{Kg}\cdot\text{mm}$. De lo observado cabe destacar que la distribución de esfuerzos de flexión entre paredes horizontales y verticales muestra cierta interacción entre las mismas. Con respecto a los desplazamientos estos son elevados para el instante de carga analizado lo cual coincide con el hecho de que la rotura se produjo al tiempo $t: 10\text{seg}$.

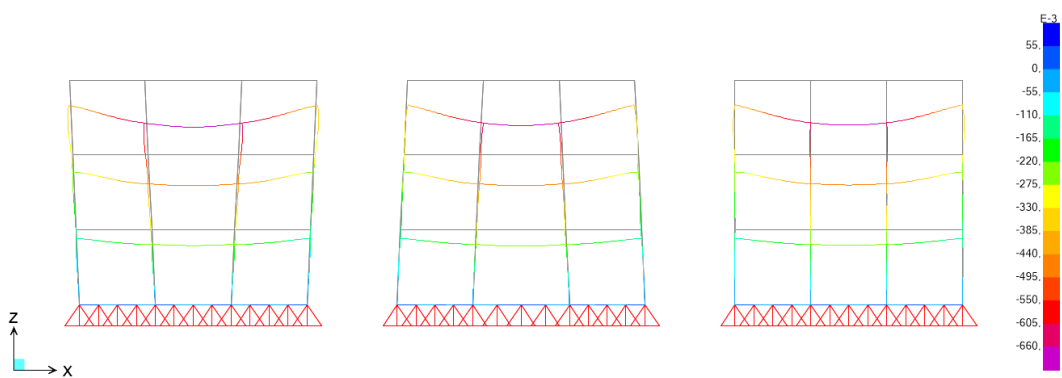


Figura 7. Deformaciones en Z [mm].

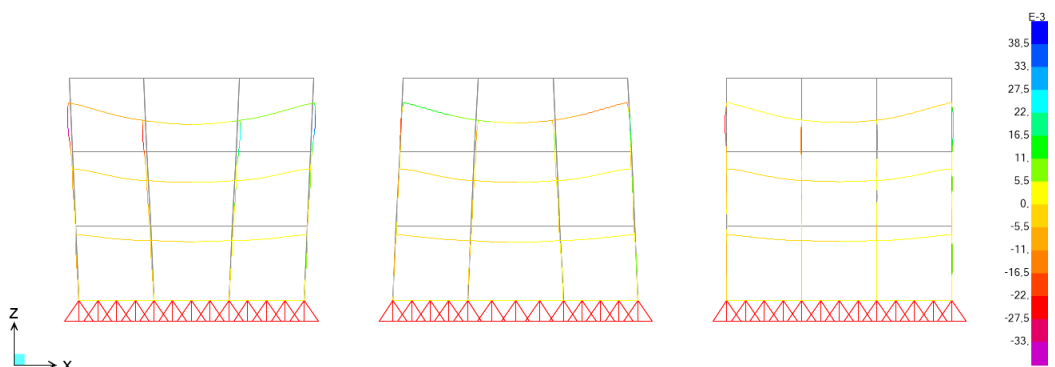


Figura 8. Deformaciones en X [mm].

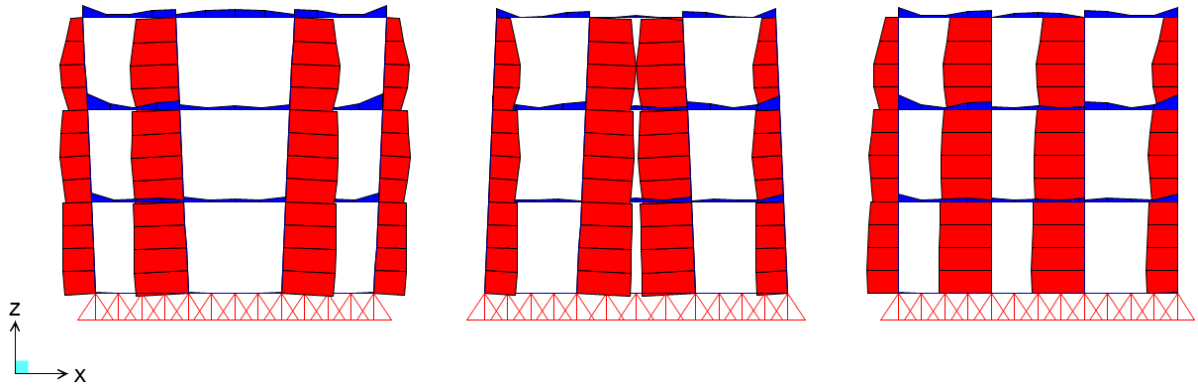


Figura 9. Tensiones [kg/mm²]: En rojo compresión y azul tracción:

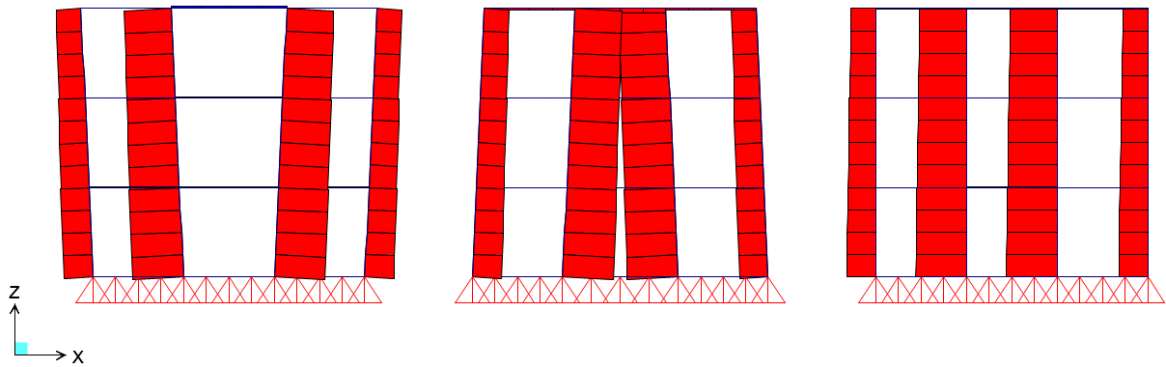


Figura 9. Esfuerzo Axial [kg]: En rojo compresión y azul tracción:

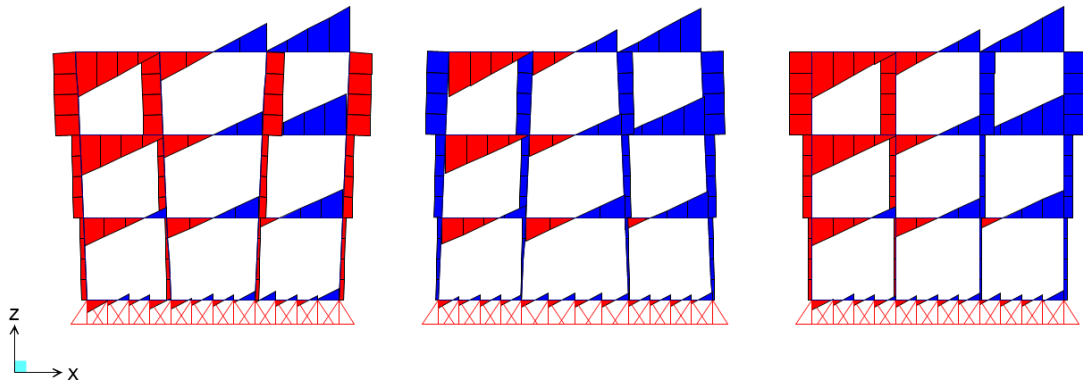


Figura 10. Corte [kg].

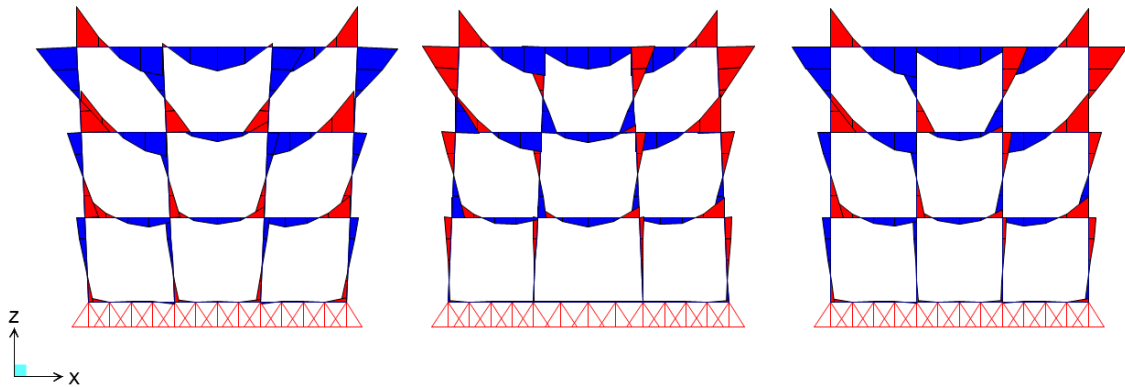


Figura 11. Momento flector [kg.mm].

Curvas desplazamiento tiempo de puntos [mm]:

Se identificó un punto en cada modelo con el fin de comparar sus deformaciones:

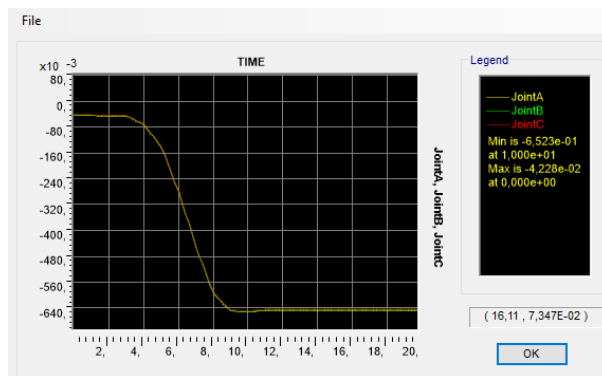
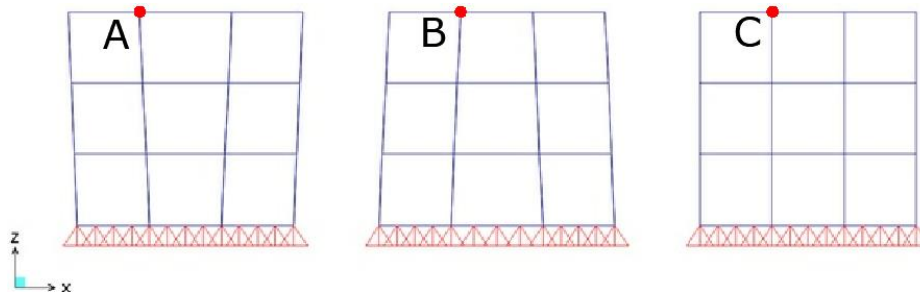


Figura 12. Comparación de Desplazamientos en modelos 311 [mm].

TIME	FUNCTION JointA	FUNCTION JointB	FUNCTION JointC
0,0	-0,04532	-0,04312	-0,04228
0,2	-0,04532	-0,04312	-0,04228
0,4	-0,04532	-0,04312	-0,04228
0,6	-0,04532	-0,04312	-0,04228
0,8	-0,04532	-0,04312	-0,04228
1,0	-0,04532	-0,04312	-0,04228
1,2	-0,0457	-0,0431	-0,04266
1,4	-0,04609	-0,0439	-0,04305
1,6	-0,04648	-0,04429	-0,04343
1,8	-0,04686	-0,04467	-0,04382
2,0	-0,04725	-0,04506	-0,04421
2,2	-0,04717	-0,04498	-0,04413
2,4	-0,04709	-0,0449	-0,04404
2,6	-0,04701	-0,04482	-0,04396
2,8	-0,04692	-0,04473	-0,04388
3,0	-0,04685	-0,04466	-0,0438
3,2	-0,05222	-0,05004	-0,04916
3,4	-0,0576	-0,05544	-0,05453
3,6	-0,06296	-0,06082	-0,05988
3,8	-0,06836	-0,06623	-0,06527
4,0	-0,07371	-0,0716	-0,07061
4,2	-0,08715	-0,08507	-0,08402
4,4	-0,10055	-0,09851	-0,09738
4,6	-0,11399	-0,11198	-0,11078
4,8	-0,12738	-0,12542	-0,12415
5,0	-0,14082	-0,13889	-0,13755
5,2	-0,16857	-0,16671	-0,16524
5,4	-0,19637	-0,19459	-0,19297
5,6	-0,2241	-0,22241	-0,22064
5,8	-0,25192	-0,2503	-0,24839
6,0	-0,27964	-0,2781	-0,27605
6,2	-0,31364	-0,3122	-0,30997
6,4	-0,34752	-0,34618	-0,34378
6,6	-0,38153	-0,38028	-0,3777
6,8	-0,41541	-0,41426	-0,41151
7,0	-0,44942	-0,44838	-0,44544
7,2	-0,47835	-0,4774	-0,47431
7,4	-0,50743	-0,50656	-0,50332
7,6	-0,53636	-0,53558	-0,53218
7,8	-0,56543	-0,56474	-0,56119
8,0	-0,59437	-0,59376	-0,59006
8,2	-0,60538	-0,6048	-0,60104
8,4	-0,61622	-0,61568	-0,61187
8,6	-0,62725	-0,62674	-0,62287
8,8	-0,63807	-0,6376	-0,63367

Se puede notar que los desplazamientos de los tres puntos analizados prácticamente no difieren entre sí, por lo tanto, esto estaría acusando una poca influencia, en cuanto a desplazamientos, provocada por la variación en la geometría entre cada modelo.

Comparación Ensayo-Modelo

Tabla 1. Estado último en ensayo experimental.

LADRILLO 311						
Tiempo (seg.)	Fleximetro	Celda de Carga	[mm]	[kgf]	Tension [MPa]	Def Especifica
8,6	2,193	2444,136	0,688	2323,482	3,382	4,02E-03

Para comparar las deformaciones se analiza el punto central de la barra central superior de cada modelo por ser éste el lugar de ubicación del flexímetro durante el ensayo:

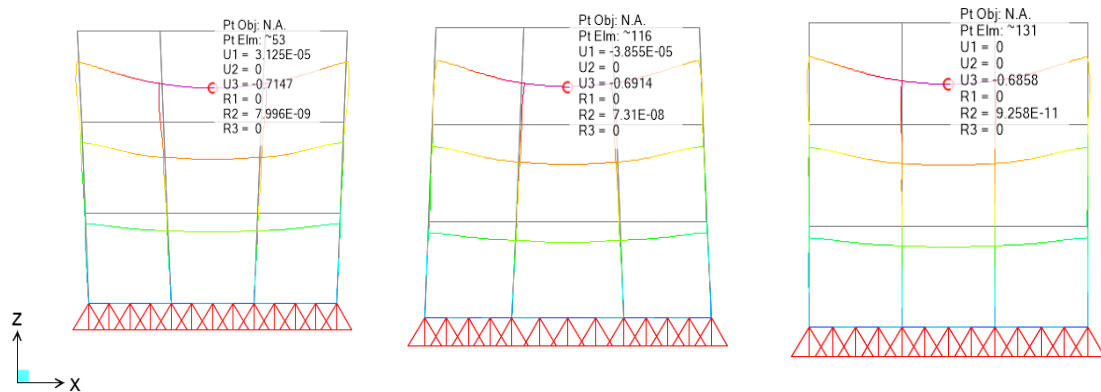


Figura 13. Comparación de desplazamientos en mm.

Tensiones [kg/mm²]:

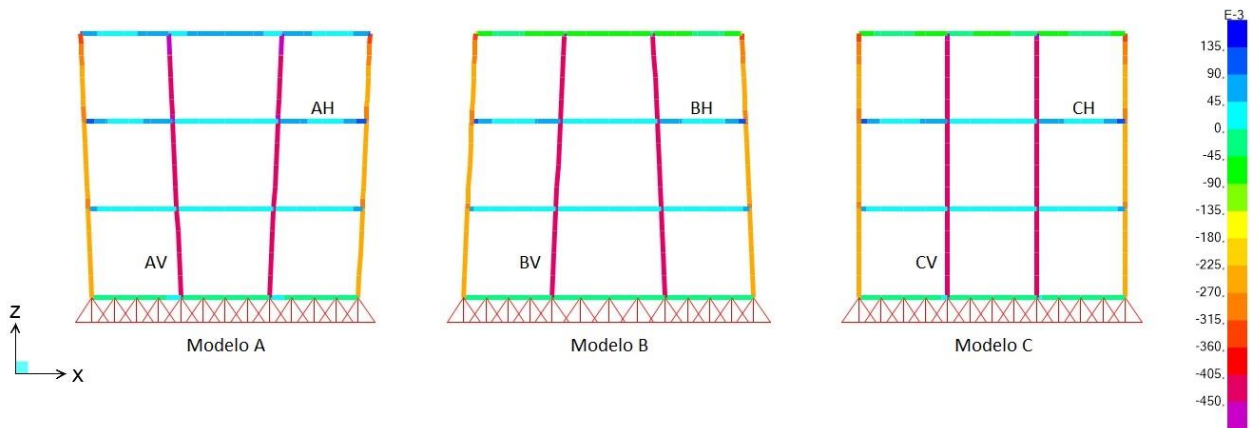


Figura 14. Distribución de Tensiones en modelos numéricos.

Tabla 2. Comparación de Tensiones entre experimento y Modelos numéricos.

i	Probetas	LCH311	Modelo A	Modelo B	Modelo C
fc [kg/mm ²]	1,246	0,338	0,418	0,423	0,419
			0,320	0,323	0,322
ft [kg/mm ²]	0,167		0,128	0,114	0,120
%	100,0	27,1	34	34	34
			25,7	25,9	25,8
%	100,0		76,6	68,3	71,9
Deformación [mm]		0,688	0,715	0,691	0,686

La fila resaltada de las tensiones de compresión (f_c) correspondiente a los modelos es la obtenida de un promedio ponderado (igual criterio que para distribuir las cargas) entre las tensiones actuantes sobre las paredes verticales externas e internas de los primeros tres huecos del LCH; mientras que la primera fila de f_c corresponde a las máximas tensiones de compresión obtenidas por el software en los modelos y corresponden en los tres casos a las paredes verticales de los últimos tres huecos (AV, BV, CV en el diagrama).

Con respecto a las tensiones de tracción (f_t), los máximos ocurren para los tres modelos en las paredes horizontales señaladas en la figura anterior. Si bien, en ninguno de los casos, tanto en el ensayo como en el modelo, se superaron las tensiones últimas de compresión y tracción, se puede observar de la tabla anterior que la falla se produce por la tracción en las paredes horizontales del ladrillo. De estos valores obtenidos se puede observar que: Para el Modelo A se obtuvieron valores de tensiones más cercanos a los últimos, su deformación está (respecto de las otras) muy por encima del registrado durante el ensayo del LCH311. En cuanto al Modelo B sus tensiones se alejan de las últimas de la probeta pero se acercan respecto a las del ensayo como así también su deformación. La desventaja del modelo radica en su geometría ya que conlleva un mayor tiempo en la confección del mismo. Del Modelo C, se pudo observar que sus tensiones de compresión son similares al B, pero la tensión máxima a tracción está más cerca del de las probetas. En cuanto a las deformaciones, es el que más se aproxima al registrado en el ensayo del ladrillo. La diferencia sustancial radica en su simple geometría, lo que la hace un modelo más práctico.

Conclusiones.

De este análisis se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

- alterar la geometría del modelo ortogonal no produce un cambio significativo en cuanto al desempeño de éste, pero sí un aumento considerable en el tiempo de armado de cada ladrillo. Por lo tanto, la propuesta sería reproducir estos tres modelos con otros ladrillos y así poder afianzar esta afirmación o bien, rectificarla.
- Los modelos se correspondieron con el experimento en términos de los valores de esfuerzos y los modos de falla ocurridos
- Se debe ampliar la base de datos mecánicos del material a efectos de poder afianzar estadísticamente la función constitutiva adoptada para el modelo numérico.
- a futuro se debe avanzar en la representación y propuesta de los criterios de rotura que mejoren el ajuste en términos de la distribución de tensiones arrojada por los modelos numéricos.

Referencias

- Oller S., Oliver J., Lubliner J., Oñate E. Un modelo constitutivo de daño plástico para materiales friccionales. Parte I: Variables fundamentales, funciones de fluencia y potencial. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 4:397-431, 1988.
- Quinteros, R. D. Modelización del comportamiento de estructuras de mampostería mediante la teoría de homogeneización. *Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta*, 2014.
- Torrisi, G. Análisis y Diseño de Estructuras de Hormigón Armado y Mampostería. *Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo*, 2012.
- SAP2000® Basic Analysis Reference Manual, Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional, Structures, *Copyright © Computers and Structures, Inc., 1978-2009. All rights reserved.*
- CSI Analysis Reference Manual For SAP2000®, ETABS®, and SAFE®. *Copyright © Computers and Structures, Inc., All rights reserved. 1978-2009.*
- Reinert, H. O., Duarte, J. A., Evaluación de solicitaciones por elementos finitos aplicada a medios continuos. *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones*, 2013.
- Reglamento CIRSOC 501-E, Viviendas de mampostería bajo compromiso estructural, *Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios*, 2005. Reglamento CIRSOC 501, Estructuras de mampostería, *Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios*, 2005.